

UHPC-NC 植筋界面抗剪性能

何化南¹, 吴奇泽², 张 潇³, 孙 松¹, 李 兵¹, 张轩祎¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 滕州市住房和城乡建设局, 山东 枣庄 277500; 3. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 沈阳 110000)

摘要: 为研究超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土(NC)植筋界面的抗剪性能, 通过 Z 型直剪试验探究了不同基体混凝土强度、界面植筋率以及钢筋在 UHPC 侧埋深对界面抗剪强度的影响, 建立了 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力计算公式。结果表明: 基体混凝土强度等级为 C30、C40 时, 界面植筋率建议为 1.22%, 基体混凝土强度等级为 C50 时, 界面植筋率建议为 1.59%; 为保证界面抗剪性能, 钢筋在 UHPC 侧的埋深应大于 8D; 最后, 提出了 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力的计算公式。

关键词: 结构工程; 超高性能混凝土; Z 型直剪试验; 植筋; 界面抗剪承载力

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3976-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240286

Shear resistance of UHPC-NC planting bar interface

HE Hua-nan¹, WU Qi-ze², ZHANG Xiao³, SUN Song¹, LI Bing¹, ZHANG Xuan-yi¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Tengzhou Housing and Urban-Rural Development Bureau, Zaozhuang 277500, China; 3. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to study the shear resistance of the interface between ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC), the effects of different matrix concrete strength, interface reinforcement planting rate and reinforcement buried depth on the shear strength of the interface were investigated through Z-type direct shear test, and the calculation formula of shear bearing capacity of uhpc-nc reinforcement planting interface was established the results show that when the strength grade of the matrix concrete is C30 and C40, the interface planting rate is recommended to be 1.22%, and when the strength grade of the matrix concrete is C50, the interface planting rate is recommended to be 1.59%. In order to ensure the shear resistance of the interface, the buried depth of the reinforcement on the UHPC side should be greater than 8D. Finally, the formula for calculating the shear bearing capacity of UHPC-NC planting reinforcement interface was proposed.

Key words: structural engineering; ultra-high performance concrete; Z-type direct shear test; planted bar; interface shear capacity

收稿日期: 2024-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478083).

作者简介: 何化南(1972-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 纤维混凝土. E-mail: hehuanandl@163.com

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)在制备时掺入钢纤维,剔除粗骨料,降低水灰比,具备优良的强度、韧性及耐久性^[1],在工程加固修补领域具有广阔的应用前景。2006年滦柏干渠大桥^[2]的竣工,标志着我国UHPC材料应用逐渐起步,之后在桥梁工程、结构加固等领域逐步推广。

植筋能够极大提高UHPC-NC界面抗剪强度和界面的抗裂性能^[3],通过双面直剪试验,霍文斌等^[3]发现植筋界面最高滑移量可达45 mm,界面抗剪承载力可以保持在500 kN以上。此外,国内外学者也对UHPC-NC植筋界面抗剪性能进行了试验和理论分析。陈甫亮等^[4]基于Z型直剪试验发现增大植筋时的埋深可以提高界面抗剪强度;王兴旺^[5]采用双面直剪试验,提出了植入铆钉时的UHPC-NC界面抗剪强度公式。但目前,UHPC-NC植筋界面抗剪强度缺乏深入的机理分析,虽然国内外学者通过界面直剪试验提出了相应承载力计算公式,如Jiang等^[6,7]分别基于经典梁理论、法国UHPC规范(AFGC 2013)设计准则提出了UHPC-NC植筋界面抗剪强度公式,但部分参数获取困难,应用具有局限性。

因此,为深入研究UHPC-NC植筋界面破坏机理,本文进行了4组UHPC-NC植筋界面Z型直剪试验,研究UHPC-NC植筋界面抗剪强度的影响因素,并提出UHPC-NC植筋界面抗剪承载力计算公式,为今后UHPC材料在加固领域的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料及混凝土强度

UHPC、NC抗压强度试验采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,试件成型后在常温下养护28 d,使用200 t微机操控电液伺服压力试验机进行加载。普通混凝土抗压强度依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)^[8]进行测试,UHPC抗压强度依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387-2015)^[9]进行测试。材料强度如表1所示。

普通混凝土配筋、界面受剪钢筋选用HRB400热轧带肋钢筋,弹性模量为200 GPa,屈服强度标准值为400 MPa,设计值为360 MPa。

表1 混凝土材料基本力学性能试验值

Table 1 Test values of basic mechanical properties of concrete materials

材料	抗压强度/MPa
C30	33.36
C40	43.52
C50	52.47
UHPC	146.06

1.2 试验分组及试件设计

试验共分为4组,分别以受剪钢筋直径 D 、钢筋埋深 h_{ef} 以及基体混凝土强度为变量,前3组试验分别研究基体混凝土强度等级为C30、C40、C50下的界面植筋率对UHPC-NC植筋界面抗剪性能的影响,其中钢筋预先埋入NC侧以模拟植筋。第4组试验研究基体混凝土强度等级为C40、直径为10 mm的钢筋在UHPC中的埋深对UHPC-NC植筋界面抗剪强度的影响。试验分组见表2。

表2 试验分组

Table 2 Experimental grouping

分组	钢筋直径 D / mm	在NC中的 埋深/mm	在UHPC中的 埋深 h_{ef} /mm
1~3	8、10、12、14、16	100	6D
4	10	100	2D、4D、6D、8D、10D

UHPC-NC组合试件尺寸为240 mm×225 mm×405 mm,UHPC、NC体积各占1/2,上下错位30 mm,黏结面尺寸为225 mm×225 mm。同时NC侧采用C10钢筋进行配筋加固,试件设计及黏结面植筋布置如图1所示。

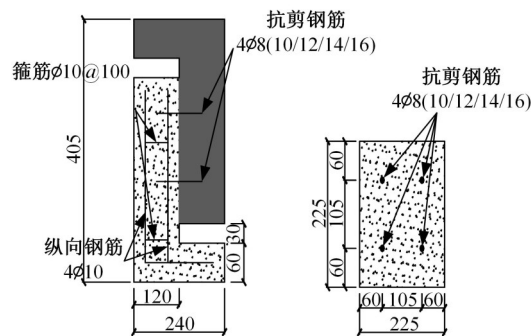


图1 试件设计(mm)

Fig. 1 Design of test specimen (mm)

1.3 界面抗剪性能测定

试验在WAW-600D微机控制电液伺服万能试验机上进行,使用荷载控制,加载速率为0.2 kN/s;为绘制UHPC-NC植筋界面黏结滑移曲线,在界面上下处采用角钢外贴位移计,精度为

0.001 mm;同时在试件顶部放置压力传感器,型号为 HZC-02,量程为 50 t,测量精度为 0.05%,位移计、荷载传感器测量的数据通过东华 3820 数据采集系统进行收集。试件加载示意图见图 2。

以界面植筋率 ρ_{sv} 表示单位界面受剪钢筋截面面积 ρ_{sv} ,如下所示:

$$\rho_{sv} = A_{sv}/A_{cv} \quad (1)$$

式中: A_{sv} 为新旧混凝土黏结面受剪钢筋截面总面积; A_{cv} 为新旧混凝土黏结面的面积。

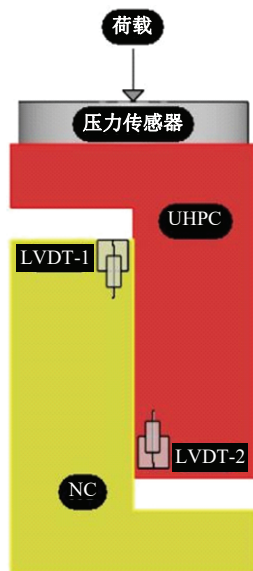


图 2 加载示意图

Fig. 2 Loading diagram

试件破坏后记录破坏荷载, UHPC-NC 植筋界面抗剪强度计算公式如下:

$$\tau = \frac{P_u}{a \times b} \quad (2)$$

式中: τ 为 UHPC-NC 植筋界面抗剪强度; P_u 为植筋界面的极限荷载; a 、 b 为黏结面的尺寸,本文试验中, $a \times b = 225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 界面抗剪强度

通过直剪试验得到的植筋界面抗剪强度及对应的界面滑移如表 3 所示。

界面植筋率、钢筋在 UHPC 侧埋深对 UHPC-NC 植筋界面抗剪强度的影响如图 3 所示。UHPC-NC 植筋界面抗剪强度随基体混凝土强度的提升而增大。同时,由凿毛所提供的 UHPC-NC 界面初始黏聚力也与基体混凝土强度呈正相关,两者共同提高 UHPC-NC 植筋界面的抗剪强度。

表 3 试验强度

Table 3 Test strength

实验样品	P_u/kN	S_u/mm	τ/MPa
C30-8-6D	139.0	0.49	2.75
C30-10-6D	175.0	0.55	3.46
C30-12-6D	210.0	0.75	4.15
C30-14-6D	248.0	0.79	4.90
C30-16-6D	313.0	1.02	6.18
C40(对照组)	101.0	0.30	1.99
C40-8-6D	153.0	1.10	3.02
C40-10-6D	192.0	1.18	3.79
C40-12-6D	243.0	1.37	4.80
C40-14-6D	284.0	1.47	5.61
C50-8-6D	169.0	0.60	3.34
C50-10-6D	207.5	1.12	4.10
C50-12-6D	258.0	1.32	5.10
C50-14-6D	309.0	1.70	6.10
C50-16-6D	412.0	2.00	8.14
C40-10-2D	148.5	0.24	2.93
C40-10-4D	160.0	1.14	3.16
C40-10-6D	192.0	1.60	3.79
C40-10-8D	218.0	2.84	4.31
C40-10-10D	260.0	2.84	5.14

基体混凝土强度与界面抗剪强度呈正相关:一方面混凝土强度提高能够抵挡钢筋对孔壁产生的挤压应力,使得钢筋充分锚固,有利于发挥钢筋提供的销栓抗剪力;另一方面,基体混凝土强度的提升有助于增强混凝土和钢筋的黏结,钢筋所提供的抗剪摩擦力能够发挥。

受剪钢筋直径与界面抗剪强度呈二次函数关系,同时随着界面植筋率的提升,界面破坏时的滑移距离也在增加。综合分析认为,钢筋受剪时,对界面周围的混凝土产生压应力,随着钢筋直径的增大,造成下部混凝土受压损伤,钢筋无法得到充分锚固,处于弯拉复合应力状态,因此,界面受剪破坏时,界面黏结滑移量较大。

钢筋埋深与 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力的拟合曲线如图 3 所示。试验表明:钢筋在 UHPC 中埋深增加,钢筋能够得到充分锚固,销栓力进一步发挥。同时钢筋与 UHPC 的黏结更为充分,作用在界面上的加紧力增强,进一步提高 UHPC-NC 植筋界面的抗剪强度。

2.2 界面黏结滑移曲线

界面黏结滑移曲线如图 4 所示。混凝土强度相同时,界面初始抗剪刚度与植筋直径呈负相关,这表明在加载初期,界面抗剪强度主要取决于钢

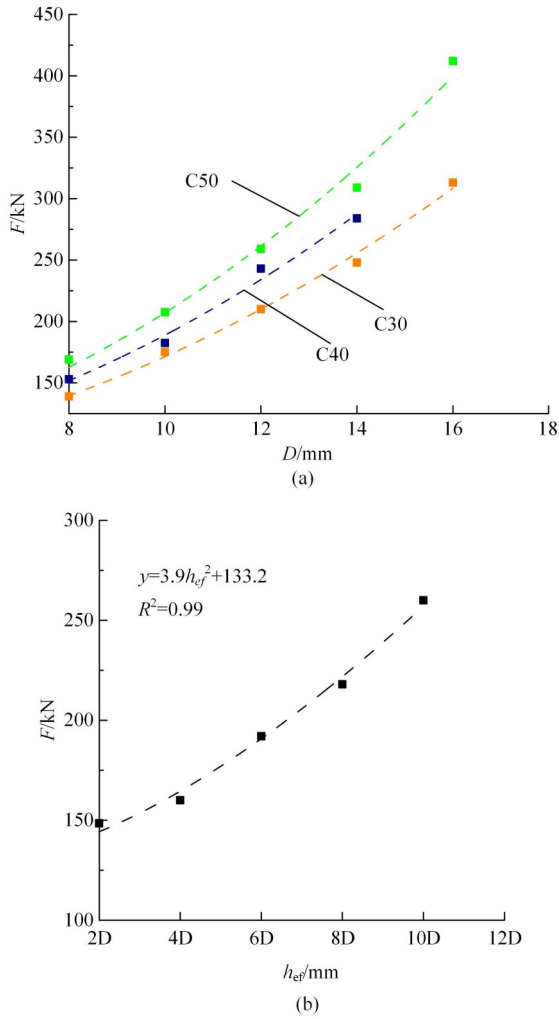


图 3 二次拟合曲线

Fig. 3 Quadratic fitting curve

筋与混凝土之间的相互作用,C50组界面黏结滑移曲线更为显著。钢筋受剪时,会对周围混凝土造成压应力,当钢筋直径较小时,混凝土能充分握裹钢筋,界面抗剪强度来源于钢筋的剪切力,黏结滑移曲线斜率较高;当直径增大时,由于混凝土受到损伤,钢筋处于弯拉复合应力状态,界面黏结滑移曲线斜率降低。

除 C30 组外,其余试件在加载初期的界面黏结滑移曲线均为下凹形。综合 C40 对照组分析可知,在加载初期,UHPC-NC 植筋界面抗剪强度由新旧混凝土黏结强度和钢筋与混凝土间的相互作用共同提供。当混凝土强度较低时,钢筋的弯拉复合应力、销栓力为界面抗剪强度的主要来源,界面抗剪强度迅速发展,直到破坏荷载,黏结滑移曲线在加载初期呈上凸形;随着混凝土强度的提高,新旧混凝土的黏结、钢筋弯拉复合应力共同抵抗荷载,因此,界面黏结滑移曲线在加载初期表现为

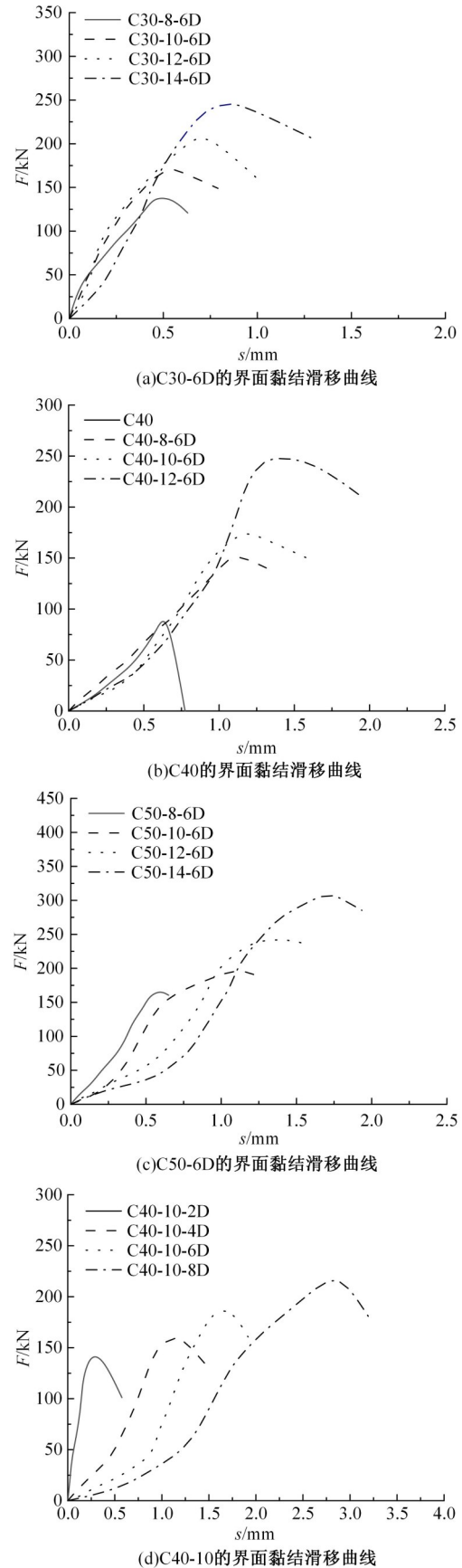


图 4 界面黏结滑移曲线

Fig. 4 Interface bond slip curve

下凹形,经过一段时间加载后,新旧混凝土界面黏结强度消失,钢筋的抗剪摩擦力和销栓力抵抗荷载,界面黏结滑移曲线斜率有所增大,逐步变为上凸形,直至达到破坏荷载。

综上所述,为使钢筋充分发挥销栓作用,界面除具备较高的抗剪强度、延性外,当基体混凝土等级为 C30、C40 时,界面植筋率建议为 1.22%;在 C50 混凝土中,界面植筋率建议为 1.59%。

钢筋埋深为 $2D$ 时,界面黏结滑移曲线近似线性,且斜率与另外 3 组加载后期黏结滑移曲线的斜率相当,甚至更大,表明钢筋的力学性能能够得到发挥。但随着钢筋在 UHPC 侧埋深的增加,界面黏结滑移曲线的斜率有所降低,且曲线斜率的上升段在界面发生相对滑移量较大后才出现。结合前文分析,由于钢筋提供的抗剪摩擦力导致与混凝土不可避免地发生相对滑移,当界面承力一段时间后,销栓作用能否充分发挥,取决于钢筋在 UHPC 内的剩余有效埋深。埋深为 $8D$ 时,由于钢筋剩余埋深不足,自身销栓力无法进一步发挥,因此,界面黏结滑移曲线的斜率较小;埋深为 $10D$ 时,剩余埋深能够保证钢筋充分锚固,界面抗剪承载力进一步增强,黏结滑移曲线的斜率也因此能够保持在较高水平。综上所述,为保证界面具备良好的抗剪性能,植筋时钢筋在 UHPC 侧的埋深应大于 $8D$ 。

2.3 钢筋应变

界面破坏时钢筋应变发展情况如图 5 所示。未开裂前,UHPC-NC 界面主要靠界面间黏聚力承担剪力,钢筋应变随着荷载呈现线性增加趋势;当界面开裂后,界面抗剪承载力变成由钢筋的抗剪摩擦力和销栓作用力共同承担,因此,钢筋应变随荷载增加急速增大,结合 C40 无植筋界面的破坏荷载为 101 kN,对植筋界面分析如下:当荷载增大到 100 kN 附近时,界面黏聚力退出工作,之后由钢筋承受剪切荷载,钢筋应变迅速增大。此时,钢筋应变趋势分为如下两种情况。

(1)直径较小(如 8、10 mm)的植筋界面。混凝土能够抵挡钢筋的压应力,钢筋能够充分锚固,界面抗剪承载力以钢筋销栓力为主,此时钢筋纵向应变突然增大;随后达到界面极限剪力,但因钢筋与混凝土之间的机械摩擦作用,UHPC-NC 界面无法分离。

(2)直径较大(如 14、16 mm)的植筋界面。由

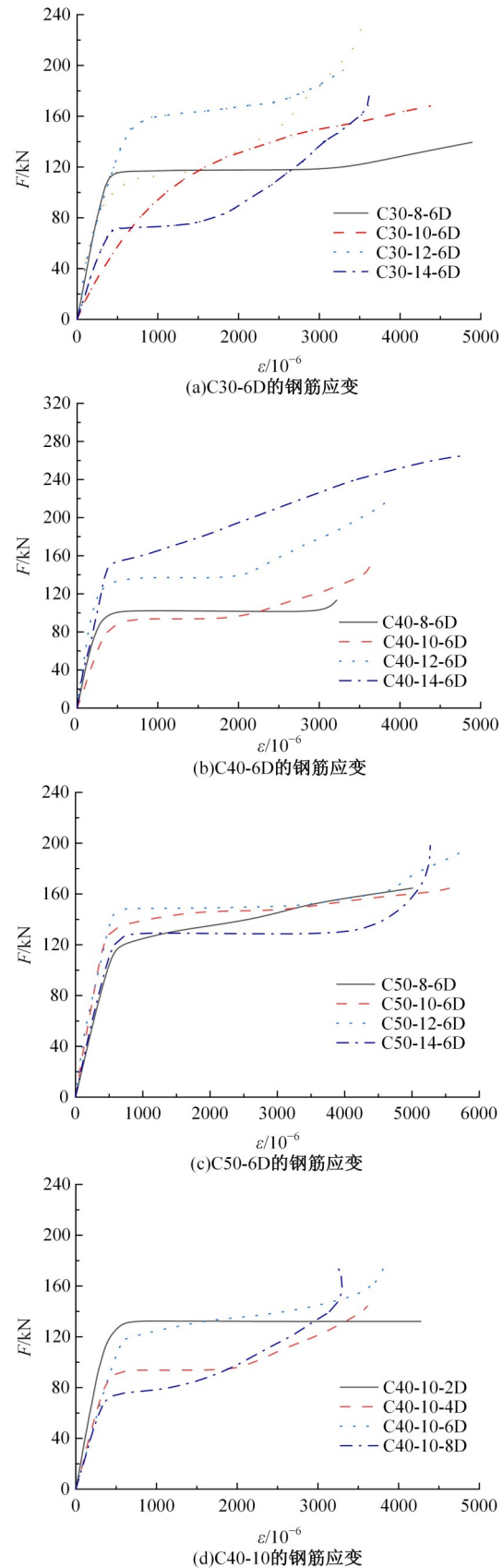


图 5 钢筋应变

Fig. 5 Reinforcement strain

于混凝土无法承受钢筋的挤压,钢筋附近混凝土受损。当界面黏聚力消失后,钢筋处于弯拉复合受力状态,此时钢筋的销栓作用与自身的抗剪摩擦力耦合效应明显,在加载后期,应变缓慢增大,直至界面达到抗剪承载力。部分试件,如 C50-14-6D 界面在极限剪力处钢筋出现应变回缩,这表明此时钢筋已完全丧失与混凝土的黏结,钢筋从混凝土中拔出。

试件破坏时,各组钢筋均达到了屈服应变。埋深较小时,钢筋的极限应变反而有所提升。因此,建议在 UHPC 植筋加固中,为使钢筋自身的销栓作用能够得到充分利用,可以考虑缩短钢筋外露长度,同时界面植筋率应大于 0.89%,以保证界面具备一定的抗剪性能。钢筋受力分析如图 6 所示。

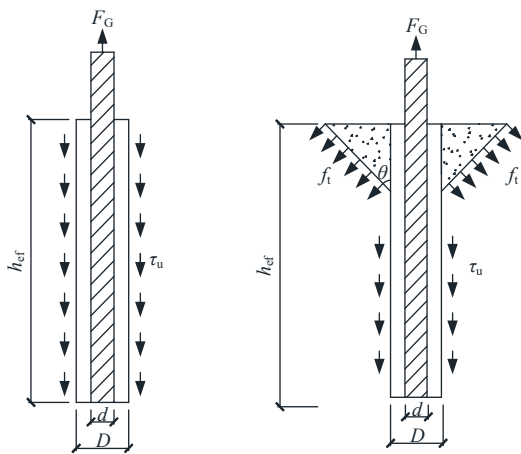


图 6 钢筋受力分析

Fig. 6 Stress analysis of reinforcement

3 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力分析

3.1 抗剪承载力理论分析

文献 [10] 探讨分析了 Birkeland H W 和 Birkeland P W 提出的新老混凝土界面的摩擦抗剪理论,基于此,Randl^[11]将界面抗剪强度分成新旧混凝土间黏聚力、钢筋抗剪摩擦力和钢筋销栓力 3 部分,图 7 为抗剪摩擦力示意图。

新老混凝土界面的摩擦抗剪理论,假定界面发生相对滑移时,将界面简化为角度为 φ 的锯齿形状以模拟界面受损时的滑移,并且认为发生剪切滑移量 Δ 时,钢筋能够屈服。抗剪摩擦力为:

$$V_n = A_{vf} f_y \tan \varphi \quad (3)$$

式中: V_n 为界面抗剪摩擦力; A_{vf} 为抗剪钢筋面积;

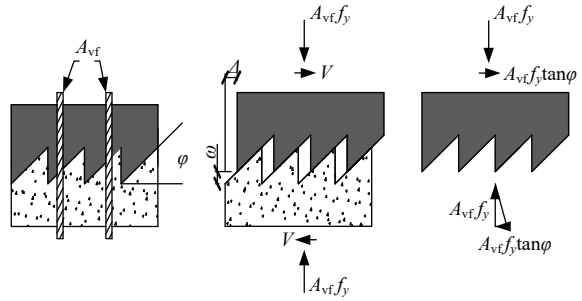


图 7 抗剪摩擦力

Fig. 7 Shear friction

f_y 为抗剪钢筋屈服强度。

结合试验结果,对 UHPC-NC 植筋界面抗剪强度分析如下所示。

(1) UHPC-NC 间界面黏聚力。影响 UHPC-NC 界面黏聚力 V_1 的因素主要为界面处理方式和基体混凝土强度。在进行黏聚力的计算时,引入界面影响系数表示界面处理对黏聚力的影响。

$$V_1 = \xi_1 \cdot A_c f_c' \quad (4)$$

式中: ξ_1 为混凝土间界面粗糙度对黏结强度的影响系数; A_c 为 UHPC-NC 黏结面界面面积; f_c' 为新旧混凝土强度,取较低侧混凝土的抗压强度。

(2) 钢筋抗剪摩擦力。在进行钢筋抗剪摩擦力 V_M 计算时,考虑到与销栓力的耦合效应,以影响系数 ξ_2 的形式表示在此部分的计算中。

$$V_M = \xi_2 \cdot F_G \quad (5)$$

式中: ξ_2 为界面受剪时,钢筋抗剪摩擦力与销栓力的耦合系数; F_G 为界面受剪时钢筋与混凝土的相对滑移引起的拉拔力。

当埋深较浅时,界面发生锥体-黏结破坏,拉拔力由锥体-黏结强度下单根钢筋所提供的最大抗拉承载力 F_{G1} 提供;当埋深增大时,拉拔力由钢筋销栓力 F_{G2} 提供。

$$F_{G1} = \left[\pi \left(\frac{D}{2} + l_a \tan \theta \right) \frac{\left(\frac{D}{2 \tan \theta} + l_a \right)}{\cos \theta} - \pi \frac{D}{2} \frac{D}{2 \sin \theta} \right] f_t \sin \theta + \pi D (h_{ef} - l_a) \tau_u \quad (6)$$

参考文献 [12] 可知, θ 一般取 45° ,代入式(6)整理得:

$$F_{G1} = \left[\pi \left(\frac{D}{2} + l_a \right) \left(\frac{D}{2} + l_a \right) - \pi \frac{D^2}{4} \right] f_t + \pi D (h_{ef} - l_a) \tau_u = \pi \left[(l_a^2 + D l_a) f_t + D (h_{ef} - l_a) \tau_u \right] \quad (7)$$

对式(7)中 l_a 求导, 令 $\frac{dF_{G1}}{dl_a} = 0$, 整理即可求出混凝土锥体-黏结破坏下的最小锥体高度 l_a :

$$\frac{dF_{G1}}{dl_a} = \pi[(D + 2l_a)f_t - D\tau_u] = 0$$

$$l_a = \frac{D}{2} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) \quad (8)$$

将其代入式(7)中即可得到锥体-黏结强度下单根钢筋所提供的最大抗拉承载力为:

$$F_{G1} = \pi \left\{ \left[\frac{D^2}{4} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right)^2 + \frac{D^2}{2} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) \right] f_t + D \left[h_{ef} - \frac{D}{2} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) \right] \tau_u \right\} =$$

$$\frac{\pi D^2}{4} f_t \left(\frac{\tau_u}{f_t} + 1 \right) \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) + \pi D \tau_u \left[h_{ef} - \frac{D}{2} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

(3) 钢筋销栓力。目前关于钢筋销栓力的计算, 大多(例如文献[13])采用Dulacska基于弹性地基梁理论提出的关于钢筋的销栓力计算公式, 其理论示意图如图8所示。

$$F_{G2} = 1.27 d_b^2 \sqrt{f_y f'_c}, \quad h_{ef} > l_a \quad (10)$$

式中: d_b 为界面受剪钢筋的直径。

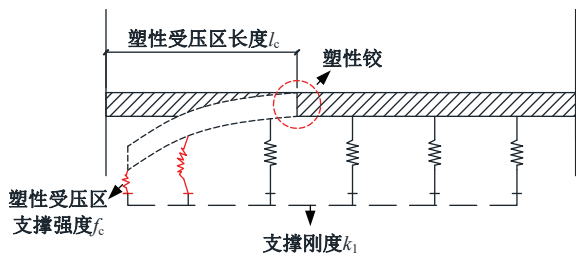


图8 弹性地基梁(BEF)理论

Fig. 8 Theory of beam on elastic foundation (BEF)

汇总即可得到不同埋深下的UHPC-NC植筋界面抗剪强度理论推导公式 V 为:

$$V = \begin{cases} \xi_1 A_c f'_c, & h_{ef} = 0 \\ \xi_2 \cdot F_{G1} = \xi_2 \left\{ \frac{\pi D^2}{4} f_t \left(\frac{\tau_u}{f_t} + 1 \right) \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) + \pi D \tau_u \left[h_{ef} - \frac{D}{2} \left(\frac{\tau_u}{f_t} - 1 \right) \right] \right\}, & 0 < h_{ef} \leq l_a \\ \xi_2 \cdot F_{G2} = 1.27 \xi_2 d_b^2 \sqrt{f_y f'_c}, & h_{ef} > l_a \end{cases} \quad (11)$$

图9为理论推导公式与试验强度对比情况^[3]。根据近年来的论文数据计算得到其中 ξ_1 、 ξ_2

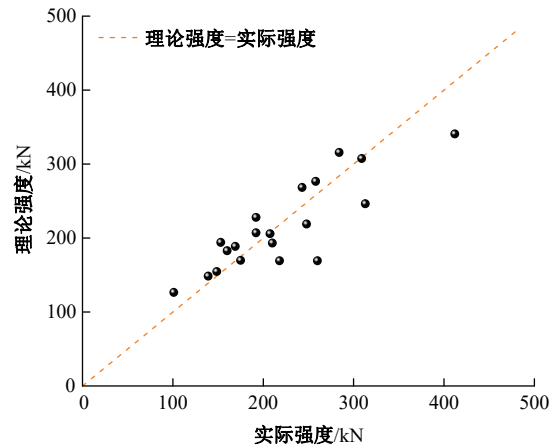


图9 理论强度与实际强度对比

Fig. 9 Comparison between theoretical strength and actual strength

的平均值分别为0.062 5、0.7, τ_u 按照《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》^[14]中规定的A级结构胶黏结抗剪强度取值。部分数据差距过大是由于为简化计算, 认为界面受剪时, 抗剪承载力以钢筋抗剪摩擦力或销栓力中的一个为主要来源, 耦合效应以系数 ξ_2 表示, 在计算时会损失掉部分承载力。

3.2 现行规范误差分析

欧洲混凝土(FIB)^[15]规范中新旧混凝土界面抗剪承载力计算见式(12), 就以摩擦抗剪理论为依据, 认为新老混凝土黏结面的抗剪强度值等于混凝土间的黏聚力、抗剪摩擦力以及钢筋提供的销栓力三者的代数和, 并且这三者在抗剪过程中并不是同时达到最大值, 以分项系数的形式表达。

$$\tau_u = \tau_a + \mu(\rho k_1 f_y + \sigma_n) + k_2 \rho \sqrt{f_y f'_c} \quad (12)$$

式中: τ_a 为新老混凝土界面的黏聚力; μ 为界面摩擦因数; ρ 为界面植筋率; σ_n 为由于界面受剪引起的法向应力; k_1 为抗弯作用系数; k_2 为销栓作用下钢筋与混凝土间的相互作用系数; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

美国道桥规范(AASHTO)^[16]中抗剪强度公式(13)同时考虑了骨料间的咬合力、界面间的摩擦力以及钢筋提供的销栓力对界面抗剪强度的贡献, 但与欧洲混凝土规范中强度公式不同的是: 骨料间的咬合力以界面黏聚力的形式引入, 并且认为在承受剪力时界面间的摩擦力以及钢筋提供的销栓力同时作用以抵抗外荷载。

$$V = c A_{cv} + \mu(A_{sv} f_y + P_c) \quad (13)$$

式中: A_{sv} 、 A_{cv} 为由外力引起的界面正压力; c 为界

面间黏聚力; μ 为界面间的摩擦因数。

两种规范计算公式误差如图 10 所示。欧洲混凝土规范中强度公式与试验值虽然较为接近,但是在应用中存在困难:公式中需要初始界面的黏聚力,并且在进行校对时发现,界面黏聚力的大小对界面强度影响较大,由于工况及界面处理方式不同,在进行计算时会出现较大偏差。

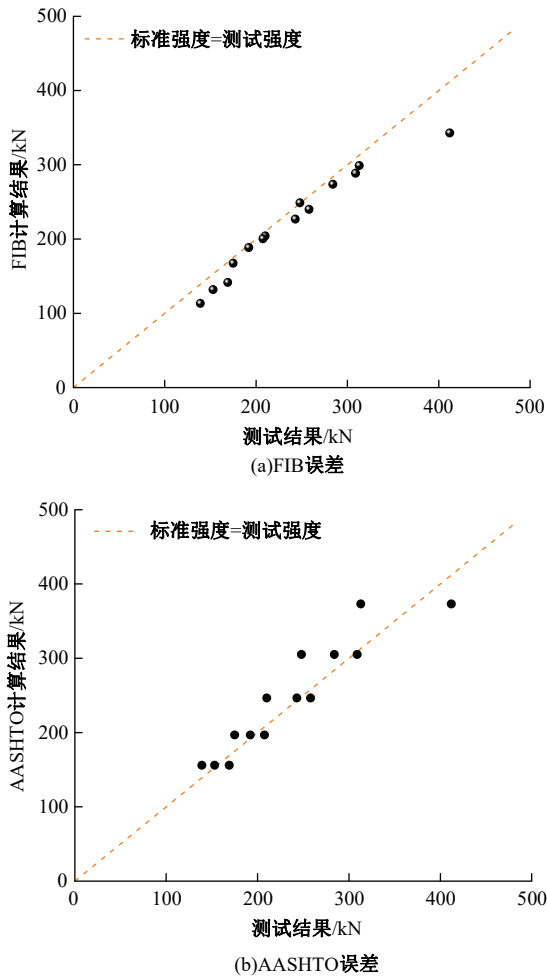


图 10 规范误差

Fig. 10 Specification error analysis

当基体混凝土强度为 C30、C50 时,美国道桥规范计算值与试验值存在较大偏差,这是由于道桥规范认为界面间的黏聚力受界面粗糙度控制,因此,同一粗糙度下,界面黏聚力取值相同,忽略基体混凝土强度的影响,对于低强度混凝土界面抗剪承载力计算较高,而对于高强度混凝土界面抗剪承载力计算则比较保守。

3.3 界面抗剪承载力计算公式

结合试验结果及理论推导,将 UHPC-NC 植筋界面抗剪强度分为界面粗糙处理的初始黏聚力及植筋提供的抗剪摩擦力、销栓力。同时为简化

计算,引入凿毛影响系数 c ,表示界面处理对抗剪承载力的影响;引入钢筋与混凝土间摩擦因数 μ ,表示钢筋受剪时钢筋的抗剪摩擦力与销栓力的耦合效应。

$$V = cA_{cv}f_c^l + \mu A_{sv}f_y \quad (14)$$

式中: c 为无量纲单位,取值为 0.04; μ 为无量纲单位,取值为 0.9。

图 11 为修正后公式与本文试验结果、相关文献试验强度对比情况。通过对比发现,将基体混凝土强度作为影响因素考虑在内,公式与试验结果平均误差缩小至 3.8%,更贴合实际;修正后的界面抗剪强度公式总体上与文献数据较为吻合,可以用于 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力计算。

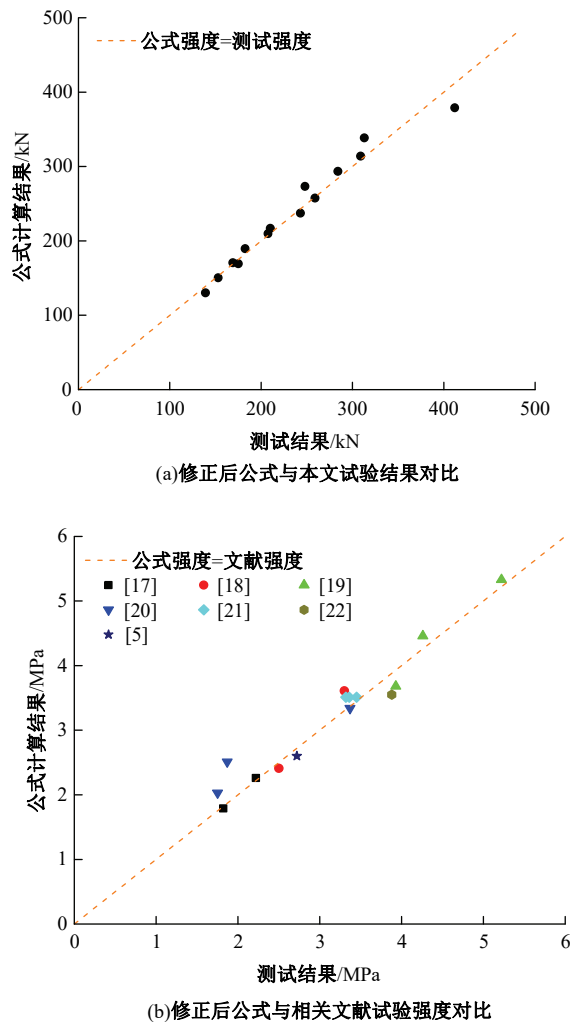


图 11 公式计算误差

Fig. 11 Formula calculation error

4 结 论

(1)为保证 UHPC-NC 植筋界面钢筋能够充分锚固,钢筋在 UHPC 侧埋深应大于 $8D$ 。

(2)UHPC-NC 植筋界面受剪时,混凝土受压损伤造成钢筋销栓力的损失不可忽视。因此,对于 C30、C40,界面植筋率建议为 1.22%、C50,界面植筋率可以提升至 1.59%。

(3)基于“剪切-摩擦”抗剪理论,提出 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力公式,并与本文试验和文献数据进行对比,结果表明该公式计算结果较为准确,可以用于 UHPC-NC 植筋界面抗剪承载力的预测。

参考文献:

- [1] 赵一鹤,孙振平,穆帆远,等. 钢纤维对 UHPC 拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 276-282.
Zhao Yi-he, Sun Zhen-ping, Mu Fan-yuan, et al. Effect of steel fiber on tensile properties and pullout behavior of UHPC[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 276-282.
- [2] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33-43.
Shao Xu-dong, Qiu Ming-hong, Yan Ban-fu, et al. Research and application progress of ultra high performance concrete in bridge engineering at home and abroad[J]. Material Guide, 2017, 31(23): 33-43.
- [3] 霍文斌,张阳,黄龙田,等. 配筋 UHPC 湿接缝界面抗弯性能及影响因素[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 525-532.
Huo Wen-bin, Zhang Yang, Huang Long-tian, et al. Flexural properties and influencing factors of reinforced UHPC wet joint interface [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 525-532.
- [4] 陈甫亮,胥卉,廖桢颖,等. 新旧混凝土叠合面抗剪性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(10): 75-79.
Chen Fu-liang, Xu Hui, Liao Zhen-ying, et al. Study on shear resistance of new and old concrete composite surface[J]. Concrete and cement products, 2020(10): 75-79.
- [5] 王兴旺. UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2016.
Wang Xing-wang. Study on shear resistance of interface between UHPC and ordinary reinforced concrete structure[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016.
- [6] Jiang H, Dong X, Fang Z, et al. Experimental study on shear behavior of a UHPC connection between adjacent precast prestressed concrete voided beams[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(12): 1-13.
- [7] Jiang H, Shao T, Fang Z, et al. Shear-friction behavior of grooved construction joints between a precast UHPC girder and a cast-in-place concrete slab [J]. Engineering Structures, 2021, 228: 1-12.
- [8] GB/T 50082—2009. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [9] GB/T 31387—2015. 活性粉末混凝土[S].
- [10] Dulacska H. Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete[J]. ACI Journal, 1972, 69(12): 754-757.
- [11] Randl N. Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness[D]. Innsbruck: Faculty of Civil Engineering Sciences, University of Innsbruck, 1997.
- [12] 刘向华. 植筋粘结锚固性能的试验研究及可靠度分析[D]. 合肥:合肥工业大学土木与水利工程学院, 2004.
Liu Xiang-hua. The experiment study on bonded anchor behavior of planted bar and reliability analysis [D]. Hefei: College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, 2004.
- [13] 李鹏飞. 考虑混凝土耦合损伤效应的钢筋销栓作用承载研究[D]. 北京:清华大学土木水利学院, 2016.
Li Peng-fei. Research on bearing capacity of reinforcement dowel action considering concrete coupling damage effect[D]. Beijing: School of Civil and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, 2016.
- [14] GB 50728—2011. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范[S].
- [15] The International Federation for Structural Concrete. Fib model code for concrete structures 2010[EB/OL]. [2024-02-25]. <https://shop.fib-international.org/publications/fib-bulletins/146-model-code-2010-first-complete-draft-volume-1-pdf>
- [16] AASHTO. LRFD bridge design specifications[S].
- [17] 舒睿彬. 植筋系统粘结滑移性能及受力机理研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2008.
Shu Rui-bin. Study on the bond-slip performance and load-transfer mechanism of bonded rebars system [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2008.
- [18] 林新鹏,黄璐,林燕英,等. 带植筋新旧混凝土粘结界面剪切强度试验研究[J]. 福建建筑, 2016(4): 48-53.

- Lin Xin-peng, Huang Lu, Lin Yan-ying, et al. Experimental study on shear strength of bonding interface between new and old concrete with embedded bars[J]. Fujian architecture, 2016 (4): 48-53.
- [19] 王二花. 植筋法新老混凝土粘结面剪切性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学环境与水利学院, 2006.
- Wang Er-hua. Experimental study on shear performance of bonding interface between new and old concrete by bar planting method[D]. Zhengzhou: College of Environmental and Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, 2006.
- [20] 江志伟. 沟槽和植筋新旧混凝土界面抗剪性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学土木与交通工程学院, 2014.
- Jiang Zhi-wei. Experimental study on shear performance of interface between new and old concrete with groove and bar planting[D]. Guangzhou: School of Civil and Traffic Engineering, Guangdong University of Technology, 2014.
- [21] 朱瑞经. 新老混凝土粘结面抗剪性能研究[D]. 石家庄: 河北工业大学土木与交通学院, 2016.
- Zhu Rui-jing. Study on shear property of new and old concrete bonding surface[D]. Shijiazhuang: School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, 2016.
- [22] Zhang Y, Zhang C, Zhu Y, et al. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC[J]. Construction and Building Materials, 2019, 236:No. 117480.